МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE





УДК 621.791.14 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-163-170

Технология и оборудование получения утолщённых кромок под сварку трением с перемешиванием

Ю. Г. Людмирский[1], А. Н. Соловьёв[1], М. В. Солтовец[1], Р. Р. Котлышев[2], И. В. Миронов[2], А. В. Крамской[3]

[1]ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[2]ООО «Головной орган по сертификации сварочного производства Южного Региона» (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)
[3]Филиал АО «АЭМ-технологии» (г. Волгодонск, Российская Федерация)

Введение. Сварка трением с перемешиванием находит широкое применение за счет определенных преимуществ этого способа. Рассмотрены факторы, снижающие прочность соединений, выполненных из высокопрочных алюминиевых сплавов. При сваривании плоских листов эффективным способом повышения прочности сварного шва является утолщение их кромок. В работе предложен способ такого утолщения, разработана установка, проведен расчет и эксперименты.

Материалы и методы. Разработано лабораторное оборудование, позволяющее одновременно выполнять утолщение двух кромок, которые подлежат сварке. Основным элементом этого оборудования является стальной валик, который прокатывается по кромкам двух заготовок и создает их утолщение за счет пластической деформации. Эта же установка может быть использована и для процесса сварки трением с перемешиванием. Для расчёта геометрии утолщённых кромок и параметров деформирующего ролика, зависящих от величины осадки кромок, разработана математическая модель на основе контактной задачи для упругого (ролик) и упругопластичного (заготовки) тел с билинейным законом упрочнения. Построена трехмерная упрощенная геометрическая модель установки, которая учитывает ее симметрию. На поверхностях контакта выбраны специальные контактные конечные элементы и произведено сгущение конечноэлементной сетки. Численная реализация модели осуществлена в пакете ANSYS.

Результаты исследования. Теоретическая модель позволяет оценивать напряжённо-деформированное состояние взаимодействующих элементов. На основе разработанной конечноэлементной модели проведены расчеты параметров утолщенных кромок и определена геометрия утолщённых кромок. На разработанном лабораторном оборудовании проведены натурные эксперименты по утолщению кромок заготовок. Результаты эксперимента подтверждают адекватность разработанной теоретической модели и расчетов на ее основе. Показана возможность регулирования размеров утолщённых кромок.

Обсуждение и заключение. Предложена технология получения утолщённых кромок в местах выполнения сварных швов, которая позволит снизить металлоёмкость конструкций и обеспечить несущую способность сварных соединений не ниже аналогичных характеристик основного металла. Разработана теоретическая модель процесса и проведен численный эксперимент, позволяющие выбрать параметры технологического процесса.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, утолщённые кромки, компьютерная модель, геометрия и размеры кромок, несущая способность сварных соединений.

Для цитирования: Технология и оборудование получения утолщённых кромок под сварку трением с перемешиванием / Ю. Г. Людмирский, А. Н. Соловьёв, М. В. Солтовец [и др]. // Advanced Engineering Research. — 2021. — Т. 21, № 2. — С. 163–170. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-163-170



Technology and equipment for friction stir preweld edge preparation

Y. G. Lyudmirsky[1], A. N. Soloviev[1], M. V. Soltovets[1], R. R. Kotlyshev[2], I. V. Mironov[2]A. V. Kramskoy[3]
[1] Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[2] Main certification body for welding production in the Southern Region (Rostov-on-Don, Russian Federation)
[3] Atommash Branch of AEM-technology JSC (Volgodonsk, Russian Federation)

Introduction. Friction stir welding is widely used due to certain advantages of this method. Factors that reduce the strength of joints made of high-strength aluminum alloys are considered. When welding flat sheets, an effective way to increase the strength of the weld is edge thickening. The paper proposes a method for such thickening. A device is developed, calculations and experiments are carried out.

Materials and Methods. Laboratory equipment has been developed to provide simultaneous thickening of two edges to be welded. The main component of this equipment is a steel roller, which is rolled along the edges of two blanks and thickens them due to plastic deformation. The same setup can be used for the friction stir welding process. To calculate the geometry of the thickened edges and the parameters of the deforming roller depending on the value of the edge settlement, a mathematical model based on the contact problem for elastic (roller) and elastoplastic (blank) bodies with a bilinear hardening law has been developed. A three-dimensional simplified geometric model of the facility with account of its symmetry has been constructed. On the contact surfaces, special contact finite elements were selected and the finite element mesh was refined. The numerical implementation of the model was carried out in the ANSYS package.

Results. The theoretical model provides assessing the stress-strain state of interacting elements. On the basis of the developed finite element model, the parameters of the thickened edges are calculated, and the geometry of the thickened edges is defined. Using the developed laboratory equipment, full-scale experiments on thickening the edges of the blanks were carried out. The experimental results confirm the adequacy of the developed theoretical model and calculations based on it. The possibility of adjusting the size of the thickened edges is shown.

Discussion and Conclusion. A technology for obtaining thickened edges in places of welds is proposed. It will reduce the metal consumption of structures and ensure the bearing capacity of welded joints not lower than similar characteristics of the base metal. A theoretical model of the process is developed, and a numerical experiment providing the selection of the process parameters is carried out.

Keywords: friction stir welding, thickened edges, computer model, geometry and dimension of edges, bearing capacity of welded joints.

For citation: Y. G. Lyudmirsky, A. N. Soloviev, M. V. Soltovets, et al. Technology and equipment for friction stir preweld edge preparation. Advanced Engineering Research, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 163–170. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2021-21-2-163-170

Введение. О высоком уровне механических свойств соединений, выполненных сваркой трением с перемешиванием (СТП), и о преимуществах этого способа сварки сообщают многие исследователи1 [1–5]. Вопросы, связанные с расчетом температурных полей при СТП рассматриваются в работе [6]. Однако, при СТП алюминиевых сплавов, высокая прочность которых достигнута термообработкой или упрочняющей деформацией, прочность сварных соединений составляет 0,78–0,94 прочности основного металла2 [7, 8]. В этих случаях компенсировать недостающую прочность возможно увеличением толщины металла в местах сварных швов или введением коэффициента запаса прочности. Последнее увеличивает вес конструкции и, соответственно, делает её неэкономичной. Обзор последних исследований, посвященных зависимости механических и микроструктурных свойств сварных швов при СТП с использование охлаждения, представлен в работе [9]. В работах [10, 11] рассматривается оптимизация процесса СТП при соединении алюминиевых сплавов. Влияние криогенной обработки и отжига на микроструктуру шва при СТП рассматривается в работе [12]. Способы достижения повышенной прочности соединения исследуются в работе [13]. Исследование влияния осевой силы при СТП рассматривается в работе [14]. Теоретические и экспериментальные исследования СТП соединения разнородных материалов и влияние не его прочность технологических параметров процесса рассматриваются в работах [15, 16].

Существуют несколько способов утолщения кромок в местах сварки. Их получают механическим или химическим фрезерованием[3,4], путём искусственного утонения основного металла, за исключением зоны, где

[1] Сергеева, Е. В. Сварка трением с перемешиванием в мировом кораблестроении. Современный уровень развития, перспективы, оборудование / HSC Consulting. URL : WWW.sergeev-hsc.de (дата обращения 12.09.2011).
[2] Технологии. Свойства соединений, полученных СТП сайт. / РЕФ.РФ. URL: http://referatwork.ru/category/tehnologii/view/492395_svoystva_soedineniy_poluchennyh_stp (дата обращения 20.08.2018)
[3] Химическое фрезерование (контурное травление) сайт. / МегаОбучалка. URL: http://megaobuchalka.ru/6/52594.html . (дата обращения 01.12.2017)

производится соединение сваркой. Однако, эти операции приводят к уменьшению коэффициента использования материала до 0,5–0,7 и увеличению стоимости конструкции. К тому же эти процессы весьма трудоемки.

Иногда утолщение свариваемых кромок получают путём наплавки, что приводит к появлению высоких остаточных напряжений, увеличению сварочных деформаций и снижению эффективности применения высокопрочных сплавов[5].

Целью данной работы является разработка и апробация технологии утолщения кромок под СТП, которая позволит увеличить коэффициент использования материала, снизить трудозатраты, увеличить несущую способность сварных соединений до уровня основного металла и повысить усталостную прочность соединений.

Материалы и методы. К геометрии утолщенных кромок, показанных на рис. 1, предъявляются следующие требования.

Во-первых, высота утолщения кромок *h* должна компенсировать недостающую прочность сварного соединения, вызванную утонением сварного шва заплечиками инструмента и разупрочнением сплавов в зоне термического влияния. Обычно, для высокопрочных алюминиевых сплавов эта величина составляет 10–25 % от прочности основного металла. В связи с этим *h*= (0,1–0,25) S, где S — толщина основного металла.

Во-вторых, ширина утолщения кромок *b* должна быть больше диаметра заплечиков инструмента для СТП.

В-третьих, ширина зоны пластических деформаций *B,* как показано на рис. 1*,* должна перекрывать зону термического влияния, образующуюся при СТП.

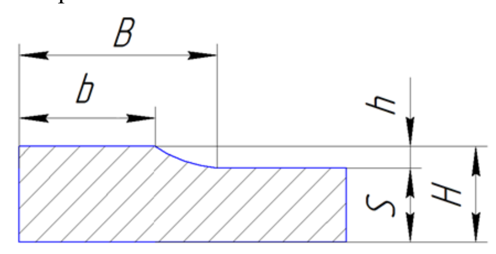


Рис. 1. Геометрия утолщённых кромок: S—толщина металла; B —ширина зоны пластической деформации; b — ширина утолщения кромок; h — высота утолщения кромок

Процесс утолщения свариваемых кромок предлагается выполнять путём холодной прокатки. На рис. 2 показана схема установки для одностороннего утолщения одновременно двух кромок, которые подлежат сварке. Причем эту операцию можно выполнять на том же оборудовании, на котором впоследствии будет выполняться сварка.

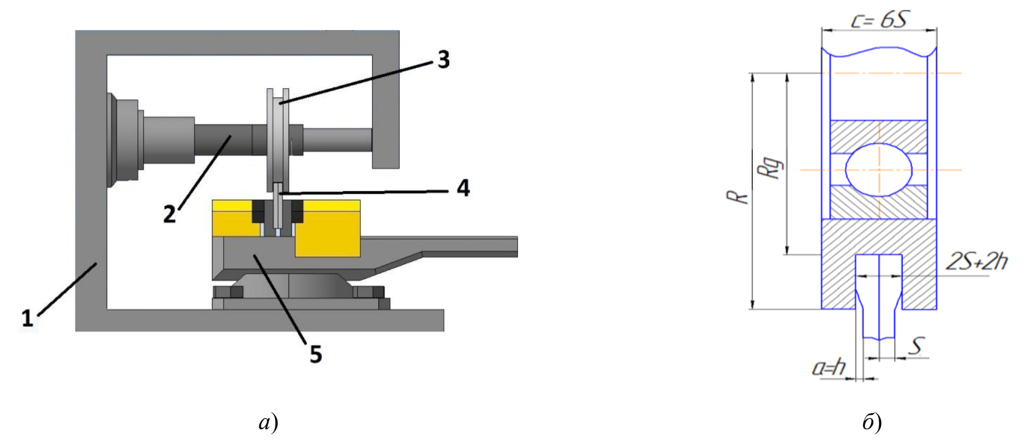


Рис. 2. Установка для утолщения кромок под СТП: *а* — общий вид установки; *б* — схема утолщения кромок

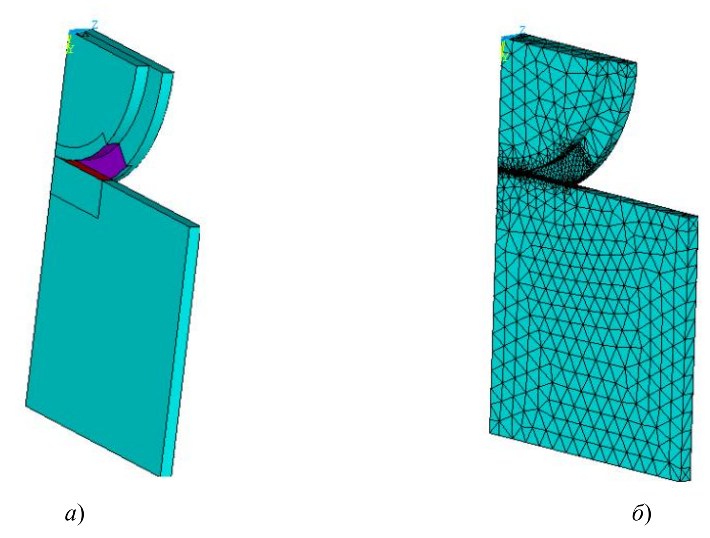
Установка для утолщения свариваемых кромок состоит из универсально-фрезерного станка 1, на скалке 2 которого установлен деформирующий ролик 3. На столе станка размещены тиски 5, в которых закреплены одновременно две заготовки 4, кромки которых подвергают утолщению. Установка работает следующим образом. Утолщаемые заготовки устанавливают вдоль ручья деформирующего ролика. Подъёмом

[4] Караченков Е.М. Повышение качества корпусных деталей ракетно-космической техники: автореферат дис. ... к-та техн. наук/ Е. М. Караченков; Гос. космич. научно-производ. центр им. М. В. Хруничева. Москва, 2000. 23 с.

[5] Повышения усталостной прочности сварных соединений / Г. И. Капырин, Л. В. Грищенко, С. А. Куркин [и др.]. №1810924/25-27; заявл. 18.07.1972; опубл. 25.08.1973, Бюл. № 31. 2 с.

стола создают заданную величину осадки кромок Δ. Включают перемещение стола вдоль ручья ролика. При этом происходит осадка свариваемых кромок на величину Δ по всей длине заготовок.

Для расчёта геометрии утолщённых кромок и параметров деформирующего ролика, зависящих от величины осадки кромок Δ, разработана компьютерная модель, которая работает в конечно-элементном пакете ANSYS. Рассматривается контактная статическая задача о вдавливании ролика в заготовки (рис. 2 *б*). В силу симметрии задачи, рассматривается упрощенная конструкция (рис. 3 *а*), которая получается рассечением исходной двумя вертикальными плоскостями (плоскость между заготовками и плоскость, проходящая через ось ролика), на которых задаются условия симметрии, и одной горизонтальной (плоскость проходящая через ось ролика) на ней задается вертикальное смещение (осадка кромок заготовок).



а) *б*)

Рис. 3. Модель контактного взаимодействия ролика с заготовкой:

а — геометрическая модель; *б* — конечно-элементная модель

В разработанной модели используется линейно-упругий материал для деформирующего ролика и билинейный упругопластический материал без упрочнения — для алюминиевой заготовки. Поверхности возможного контакта выделены (рис. 3 *а*), на них задаются контактные элементы и конечно-элементная сетка сгущена (рис. 3 *б*). Модель позволяет оценить напряженно-деформированное состояние взаимодействующих элементов конструкций в упругой и пластической областях, а также определить геометрию утолщённых кромок.

Исходными данными для работы модели являются:

— величина осадки свариваемых кромок Δ, мм;

— толщина свариваемых заготовок S, *мм*;

— ширина утолщения кромок $b \geq d/2$, *мм*, где d — диаметр заплечиков;

— величина зоны пластических деформаций $B \geq T/2$, где T — зона термического влияния при СТП, мм;

— величина утолщения кромок $h = (0{,}1–0{,}25)\ S$, *мм*;

— толщина подготовленных под сварку кромок $H=S+h$, *мм*;

— радиус деформирующего ролика $R_д \geq 70$ *мм*;

— наружный радиус ролика $R_0 = R_д + B$, *мм;*

— зазор между боковыми поверхностями ролика и заготовками $\alpha = (0{,}1…0{,}25)\ S$, *мм*;

— ширина ролика $C = 6S$, *мм;*

— модуль упругости алюминиевой заготовки $E = 0{,}7 \cdot 10^5$, МПа;

— модуль упругости стального деформирующего ролика $E = 2{,}1 \cdot 10^5$, МПа;

— коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}33$;

— предел прочности основного металла σ_b=390 МПа;

— предел текучести основного металла, σ_T=175МПа.

Результаты исследования. О геометрии утолщенных кромок в результате их осадки на величину Δ можно судить по картине распределения осевых смещений в деформируемых кромках. В таблице 1 представлены распределение напряжений в заготовках толщиной 4,0 мм, геометрия и размеры утолщённых кромок при разной степени их осадки.

Таблица 1

Распределение поперечных смещений на деформированных заготовках толщиной 4,0 мм и геометрия утолщённых кромок при разной степени их осадки

Распределения поперечных смещений в заготовках при осадке кромок	Геометрия и размеры утолщённых кромок, мм	Величина осадки кромок Δ, мм
		0,1
		0,3
		0,5
		0,8
		1,2

В таблице 2 приведены параметры, характеризующие геометрию утолщенных кромок при разной степени их осадки Δ.

Таблица 2

Размеры утолщенных кромок в зависимости от степени их осадки

Расчетные параметры утолщенных кромок, мм	Величина осадки кромок Δ, мм					
	0,1	0,3	0,5	0,8	1,2	1,5
Высота утолщенных кромок *h*	0,1	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
Ширина зоны пластической деформаций *B*	4,8	7,5	10,4	13,1	15,6	17,8
Ширина утолщённой кромки *b*	0	0,25	1,2	3,8	6,2	8,65
B-b	4,8	7,25	9,2	9,3	9,4	9,15

По данным, представленным в таблице 2, построены зависимости B и b от Δ, показанные на рис. 4.

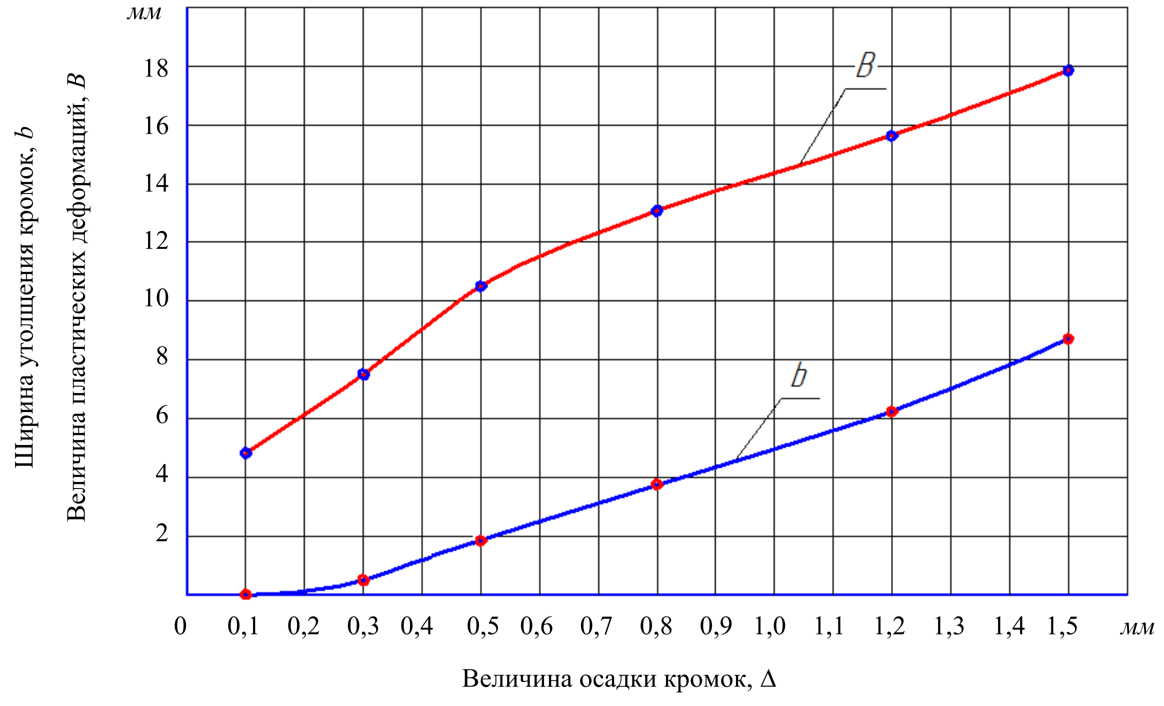


Рис. 4. Ширина утолщенных свариваемых кромок *b* и зона пластических деформаций *B* в зависимости от величины осадки кромок Δ

Следует обратить внимание на то, что при Δ≥0,5 величина (*B-b)* практически одинакова и приблизительно равны 9,2 мм. При таких размерах угол подхода сварного соединения к основному металлу φ менее 1 градуса. В связи с этим, коэффициент концентрации напряжений стремится к единице. Это позволяет утверждать, что сварные соединения, выполненные СТП по утолщенным кромкам, будут иметь высокие показатели сопротивляемости к зарождению и развитию разрушения.

Для проверки адекватности модели расчёта утолщения кромок, использующую МКЭ, определили её согласованность с практикой. Для этого на вышеописанном оборудовании были получены утолщённые кромки при их осадке на 0,5 и 1,2 мм. Профиллограммы утолщённых кромок, полученные на двухкоординатном измерительном приборе ДИП-6, представлены на рис. 5.

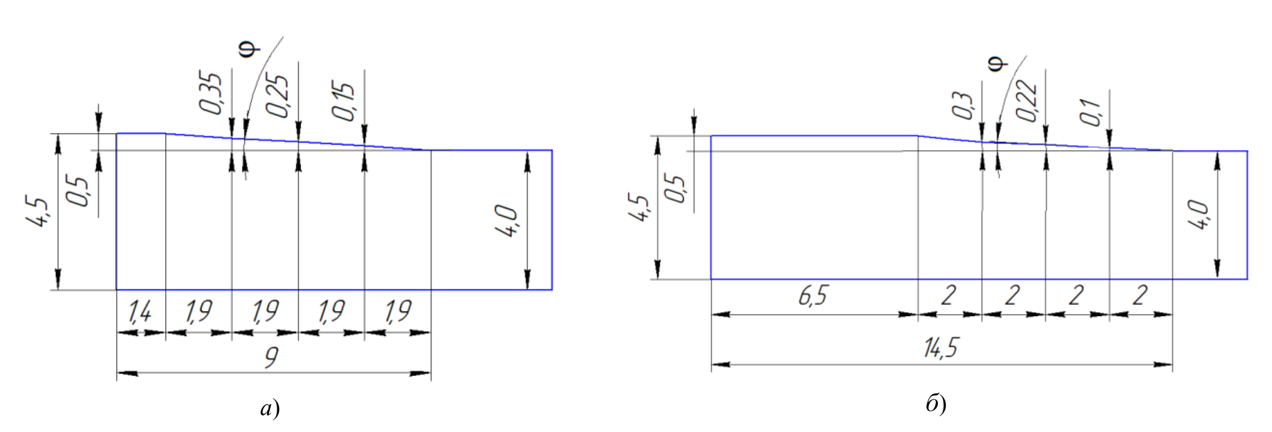


Рис. 5. Геометрия утолщенных кромок после их осадки на величину: *а* — 0,5 мм; *б* — 1,2 мм

Видно, что размеры утолщённых кромок, полученные расчётным путём с использованием МКЭ, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Расхождение не превышает 15 %.

Обсуждения и заключение. В работе предложена новая технология получения утолщённых кромок в местах выполнения сварных стыковых соединений. Разработана лабораторная установка, которая реализует предложенный метод. Основным элементом этой установки является осаживающий ролик, который действует на кромки свариваемых элементов и за счет пластической деформации вызывает утолщение этих кромок. Экспериментально исследована зависимость ширины утолщенной части в зависимости от осадки ролика. Для выбора этой осадки, при заданной ширине утолщения для различных по геометрии и механическим свойствам материалов, разработана математическая модель процесса деформирования. Эта модель реализована в конечно-элементном пакете ANSYS. Для рассматриваемого в работе материала и геометрии проведен численный эксперимент, результаты которого согласуются с данными эксперимента и подтверждают адекватность предложенной модели. Таким образом, подтверждена предложенная технология, позволяющая снизить металлоемкость конструкций и обеспечить прочность соединений не ниже прочности основного металла. Разработанная расчетная модель процесса утолщения кромок позволяет находить величину осадки деформирующего ролика для создания необходимой ширины утолщения.

Библиографический список

1. Сварка трением с перемешиванием — плюсы и минусы / В. А. Фролов, А. Н. Иванюхин, А. Н. Сабанцев [и др.] // Сварочное производство. — 2008. — №10. — С. 12–19.

2. Pengfei Yu. Analysis and characterization of dynamic recrystallization and grain structure evolution in friction stir welding of aluminum plates / Yu. Pengfei, Wu. ChuanSong, Lei Shi // Acta Materialia. — 2021. — Vol. 207. — P. 116692. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.116692

3. Defalco, J. Friction stir welding vs. fusion welding / J. Defalco // Welding J. — 2006. — Vol. 85 (3). — P. 42–44.

4. Okamura, H. Friction stir welding of aluminum alloy and application to structure / H. Okamura, K. Aota, M. Ezumi // J. of Jap. Institute of Light Metals. — 2000. — Vol. 50 (4). — P. 166–172. https://doi.org/10.2464/jilm.50.166

5. Лукьянов, В. Ф. Производство сварных конструкций (изготовление в заводских условиях) / В. Ф. Лукьянов, В. Я. Харченко, Ю. Г. Людмирский. — Ростов-на-Дону : Терра Принт, 2006. — 336 с.

6. Котлышев, Р. Р. Расчет температур при сварке трением с перемешиванием алюминиевых сплавов / Р. Р. Котлышев, Л. Г. Шучев, А. В. Крамской // Вестник Донского государственного технического университета. — 2010. — Т. 10, №5 (48). — С. 693–699.

7. Котлышев, Р. Р. Сварка трением с перемешиванием / Р. Р. Котлышев: моногр. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2012. — 135 с.

8. Покляцкий, А. Г. Сварка трением с перемешиванием –эффективный способ повышения эксплуатационных характеристик конструкций / А. Г. Покляцкий, А. Я. Ищенко, В. Е. Федорчук // Автоматическая сварка. — 2010. — № 4. — С. 45–50.

9. Virendra Pratap Singh. Mechanical and microstructural properties evolutions of various alloys welded through cooling assisted friction-stir welding: A review / Virendra Pratap Singh, Surendra Kumar Patel, Basil Kuriachen // Intermetallics. — 2021. — Vol. 133. — P. 107122. https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107122

10. Mrinal Sahu. Optimization of process parameters of friction stir welded joints of marine grade AA 5083 / Mrinal Sahu, Atanu Paul, Subhas Ganguly // Materials Today: Proceedings. 2021. — Vol. 44(2). — P. 2957–2962. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.938

11. Optimization of friction stir welding parameters during joining of AA3103 and AA7075 aluminium alloys using Taguchi method / Anil Raj, J. Pratap Kumar, Anil Melwin Rego [et al.] // Materials Today: Proceedings, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.246

12. Effects of cryogenic and annealing treatment on microstructure and properties of friction stir welded TA15 joints / Xianglai Xu, Xueping Ren, Hongliang Hou, Xian Luo // Materials Science & Engineering A. — 2021. — Vol. 804. — P. 140750. https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.140750

13. High-strength joint of nuclear-grade FeCrAl alloys achieved by friction stir welding and its strengthening mechanism / Yanying Hu, Yunqiang Zhao, Yongbing Peng [et al.] // Journal of Manufacturing Processes. — 2021. — Vol. 65. — P. 1–11. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.03.007

14. An investigation of the impact of axial force on friction stir-welded AA5086/AA6063 on microstructure and mechanical properties butt joints / R. Ramamoorthi, K. P. Yuvaraj, C. Gokul [et al.] // Materials Today: Proceedings. — 2021. — Vol. 37 (2). — P. 3159–3163. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.050

15. Sucharitha, M. Experimental investigations on the effect of tool rotational speed on mechanical properties and microstructure of friction stir welded AZ31 Mg alloy / M. Sucharitha, B. Ravi Sankar, P. Umamaheswarrao // Materials Today: Proceedings, 2021. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.788

16. Kareem N. Salloomi. Coupled Eulerian-Lagrangian prediction of thermal and residual stress environments in dissimilar friction stir welding of aluminum alloys / Kareem N. Salloomi, Sanaa Al-Sumaidae // Journal of Advanced Joining Processes. — 2021. — Vol. 3. — P. 100052. https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100052

Поступила в редакцию 22.03.2021
Поступила после рецензирования 05.04.2021
Принята к публикации 09.04.2021

Об авторах:

Людмирский Юрий Георгиевич, профессор кафедры «Машины и автоматизация сварочного производства», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-0639-2597, lyudmirskiy40@mail.ru

Соловьев Аркадий Николаевич, заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор физико-математических наук, профессор, ResearcherID H-7906-2016, ScopusID 55389991900, ORCID: http://orcid.org/0000-0001-8465-5554, Solovievarc@gmail.com.

Солтовец Марат Васильевич, доцент кафедры «Технология технического регулирования» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент

Котлышев Роман Рефатович, заместитель директора ООО «Головной орган по сертификации сварочного производства Южного Региона» (346715, РФ, Ростовская область, х. Камышеваха, улица Светлая, 2В), кандидат технических наук, kotlyshev@mail.ru

Миронов Игорь Владимирович, инженер ООО «Головной орган по сертификации сварочного производства Южного Региона» (344018, РФ, г. Ростов-на-Дону, ул. Народного Ополчения, д. 213), mironov_igor_1993@mail.ru

Крамской Александр Владимирович, ведущий инженер-технолог по сварке, филиал АО «АЭМ-технологии» «Атоммаш» в г. Волгодонск (347360, РФ, Ростовская область, г. Волгодонск, ул. Жуковское шоссе, д. 10), кандидат технических наук ORCID: http://orcid.org/0000-0003-0668-9518, ingenersvarka@yandex.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ю. Г. Людмирский — постановка проблемы, разработка схемы лабораторной установки, подготовка текста. А. Н. Соловьев — разработка математической и компьютерной модели, проведение расчетов, доработка текста, корректировка выводов. М. В. Солтовец — создание лабораторной установки, проведение эксперимента. Р. Р. Котлышев — создание лабораторной установки, анализ результатов исследований. И. В. Миронов — создание лабораторной установки, обсуждение результатов. А. В. Крамской — создание лабораторной установки, обсуждение результатов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.